

Analysis and Research on Urban Waterlogging Risk

—A Case of Guanggu Central City, Wuhan

Zhibo Ren, Xiaoli Fu*, Nansheng Li

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: rzbw@foxmail.com, *xlfu@tongji.edu.cn, linansheng@tongji.edu.cn

Received: Feb. 8th, 2019; accepted: Feb. 22nd, 2019; published: Mar. 1st, 2019

Abstract

With the development of cities and the acceleration of planning and construction of new towns, under the influence of extreme climate, the losses caused by rainstorm and flood disasters to new urban areas are also increasing. Therefore, it is very important to study the risk of waterlogging prevention in new urban areas in the process of construction. This paper takes Wuhan Guanggu Central City in the process of planning and construction as the research object. In order to analyze the flood risk in Guanggu Central City, one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic models are constructed by MIKE URBAN and MIKE 21 respectively, and the urban flood process under 50-year frequency rainstorm is calculated by MIKE FLOOD coupling. By analyzing the flood evolution process, drawing the flood risk map and analyzing the causes of waterlogging, the waterlogging risk faced by the urban area was evaluated. The results show that some areas of the Central City are faced with certain risk of waterlogging, which provides reference for the risk assessment of the next step of the city, and provides scientific decision-making basis for the flood control departments to formulate flood drainage and disaster reduction strategies.

Keywords

City Prevent Waterlogging, Waterlogging Risk Format, MIKE FLOOD, Guanggu Central City

城市防涝风险分析研究

——以武汉光谷中心城为例

任智博, 付小莉*, 李南生

同济大学, 土木工程学院, 上海
Email: rzbw@foxmail.com, *xlfu@tongji.edu.cn, linansheng@tongji.edu.cn

*通讯作者。

摘要

随着城市的发展和各地新城规划建设步伐的加快，在极端气候影响下，雨洪灾害给新建城区造成的损失也越来越大，因此对建设过程中的新城区防涝风险的分析研究变得非常重要。本文以正在规划建设过程中的武汉光谷中心城为研究对象，利用MIKE URBAN和MIKE 21分别构建中心城区一维和二维水动力模型，并通过MIKE FLOOD耦合计算了在50年一遇暴雨条件下的城市洪涝情况，通过分析洪水演进过程、绘制洪水风险图及分析内涝原因，评估城区面临的防涝风险。结果表明中心城部分区域面临一定的洪涝威胁，从而为城市下一步的风险评估提供借鉴，并为防汛部门制定排涝减灾策略提供科学的依据。

关键词

城市防涝，内涝风险，MIKE FLOOD，光谷中心城

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，一方面气候变暖使得极端气象发生的频率不断增加，另一方面城市化进程的加速，使得城市内涝情况越来越严重[1]。城市发生的洪涝灾害不仅给市民的日常生活带来困扰同时也造成了人员伤亡和经济上的巨大损失。日益严重的内涝问题所导致的各种经济社会问题成为了困扰城市正常运行的主要灾害因素[2]。为了加强城市抵御内涝风险的能力，各国学者开展了大量的研究，研究重点从造成灾害的理论方面逐渐发展到关注灾害的预测和评估内涝风险。众多的模型模拟在评估城市洪涝风险方面被广泛应用[3]。

模型模拟离不开计算机技术的发展，国外计算机技术发展较早，自20世纪60年代以来暴雨内涝模型率先在国外开始研究[4]。比较著名的有丹麦水力研究所的MIKE系列[5]。美国环境保护署的SWMM模型和英国的Info Works CS模型。其中美国的SWMM模型自开发以来，开源的特性使得其在模拟城市雨水管网和雨水径流等方面被广泛应用于世界各地[6]。此外，英国HR Wallingford的Info Works CS模型擅长模拟城市排水系统、水文循环过程等，在城市污水系统、城市雨水系统等领域有广泛的应用。它可以计算含有大量节点的模型，最终也会以友好的视频、二维和三维图输出结果[7]。国内学者在城市雨洪方面的研究稍晚[8]，Yuhui Wang等利用并行遗传算法来模拟降雨径流情况[9]；韩素芹[10]通过利用非恒定流数学模型，很好的模拟了天津城市在发生内涝灾害时的动态淹没情况；张成才[11]基于GIS技术平台开发了三维雨洪演进与实时预测模型，更加直观的呈现了模拟的效果。在众多的水力模型中DHI的专业软件计算范围广，几乎包括了自然界中水循环的过程，包括大气降雨、形成地面径流等，此外软件可以建立一维、二维甚至三维模型，因此被广泛应用于实际工程[12][13]。

武汉东湖高新区被国务院批准为高新技术产业开发区和国家光电子产业基地，即武汉中国光谷，其中光谷中心城是东湖高新区的核心，在武汉城市发展建设中具有重要的地位，目前处在大规模开发建设时期。国内外众多学者利用模型对已有一定规模的城市进行洪涝模拟并分析总结出许多防洪意见，但对

于尚在开发规划建设过程当中的城市洪涝问题还可以进行进一步的模拟和研究。本文采用 MIKE 系列中的 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型, 构建光谷中心城雨洪模型, 模拟了在 50 年一遇的暴雨重现期下城市地面洪水演进、积水情况和排水管网的排水情况。根据模拟结果, 评估在暴雨期间城市的防涝风险, 从而为处在大规模开发建设时期城市的规划和防洪减灾提供决策依据。

2. 模型介绍

2.1. MIKE URBAN 介绍

排水管网模型采用 Mike 系列软件中的 Mike Urban 模型。Mike Urban 是基于地理信息系统的用于模拟城市给排水管网的建模软件, 尤其擅长模拟计算地下管网系统中的自由水面流和管道压力流。模型在实时模拟地下排水管网系统时, 首先会用降雨径流模块计算雨水汇水量, 然后将结果作为边界条件, 导入到管网水力模块中。

有压流排水管网计算原理如下:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + U \sin \phi = 0 \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial x} + J = 0 \quad (2)$$

式中: H 为测压管水头; U 为流速; g 为重力加速度; c 为波的传播速度, $c = \sqrt{K/\rho} / \sqrt{1 + K/E \cdot D/\delta}$; K 为液体的体积模量; D 为管道直径; δ 为管壁厚度; E 为管材的弹性模量。 J 为摩阻水头损失, $J = g \frac{\lambda |U| U}{2D}$, λ 为沿程水头损失系数。

Mike Urban 模型采用隐式有限差分法来求解。

2.2. MIKE 21 介绍

地面二维模型采用 Mike 系列软件中的 Mike 21 模型。二维水动力计算模型基本原理如下:

连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = q \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Hu}{\partial t} + \frac{\partial Hu^2}{\partial x} + \frac{\partial Huv}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{H^3} u + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_T \frac{\partial Hu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial Hu}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + f_0 Hv + qu_0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Hv}{\partial t} + \frac{\partial Huv}{\partial x} + \frac{\partial Hv^2}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z}{\partial y} - g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{H^3} v + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_T \frac{\partial Hv}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial Hv}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - f_0 Hu + qv_0 \quad (5)$$

式中: q 为单位面积的源汇强度; H 为水深; Z 为水位; u 和 v 分别为垂向平均流速在 x 与 y 方向的分量; n 为糙率; g 为重力加速度; ν_T 为水流湍动扩散系数; $f_0 = 2\omega_0 \sin \psi$ 为科氏力系数, ω_0 地球自转角速度, ψ 为计算区域的地理纬度; ρ 为水流密度; u_0 、 v_0 分别为水深平均源汇速度在 x 、 y 方向的分量; τ_{sx} 和 τ_{sy} 分别表示 x 、 y 方向的水面风应力。

模型的连续、动量方程用 ADI 逐行法分别在时空上积分并用追赶法求解离散方程。

3. 模型建立

3.1. 研究区域概况

本文研究区域位于东湖高新技术开发区中部，北边为地势较高的森林公园，南面为综合保税区，西邻光谷三路，东接光谷生物医药园。核心区总面积为 23.5 km²。研究区域处于江汉冲击平原与江南丘陵过渡地带，地貌类型为剥蚀堆积岗状平原，光谷中心城地面的高程范围为 24 m~45 m。研究区位示意图如图 1 所示。

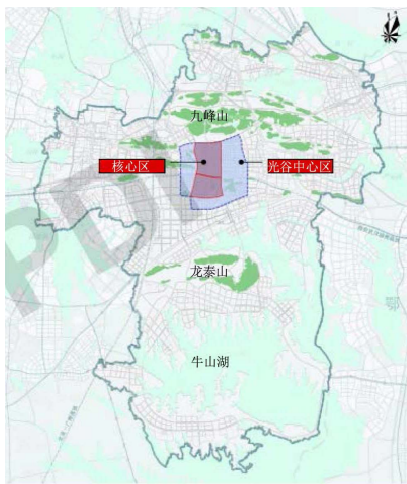


Figure 1. Position sketch of the study area

图 1. 研究区域示意图

研究区域为东南季风气候，属于典型的冬季寒冷、夏季高温区域。年平均气温 15.9℃，历史最大温差 59.3℃，最高时达到 41.3℃。区域全年降雨量比较充沛，多年平均降水量 1228.2 mm，但是时间上分布不均匀，全年 41%的降雨量集中在 6~8 月份；年降水量最大为 2107.1 mm。全年 250 天左右的无霜期。

3.2. 建模流程

利用 MIKE 系列软件中的 MIKE FLOOD 耦合计算 MIKE 21 和 MIKE URBAN 模型。其中 MIKE 21 是地表漫流模型，用来模拟雨水在地面的汇集演进情况；MIKE URBAN 模型主要用来模拟排水管网中水流流动情况。建模技术路线图如图 2 所示。

3.3. MIKEURBAN 模型建立

3.3.1. 数据资料

MIKE URBAN 的建模对象为地下雨水管网。在模型概化过程中，需要收集管网分布图，管道基本信息(尺寸、流向等)、检查井信息等。其中由于检查井的数量很多且收集到的资料较为分散，需检查和修正检查井信息。排水口为管网水体的出口，需在管网资料中找出排水口的位置。管段由检查井的分布来划分，需确定管段的起终点高程、管径和长度等。

3.3.2. 模型建立

首先将中心城区检查井以及排水管道的基本空间数据及属性信息导入 MIKE URBAN 软件中，然后利用软件自带的工具对管网的拓扑关系进行检查。修正拓扑关系后，进行集水区的划分与连接。目的是使汇水区域内的降雨能够通过与之相连的集水点流入排水管网。

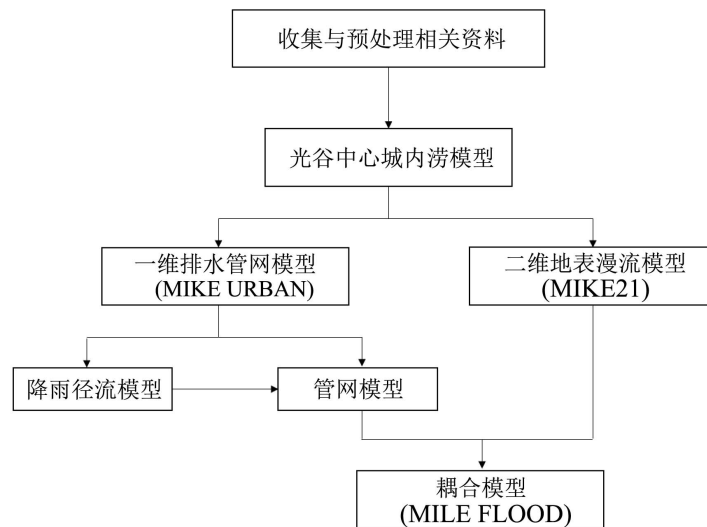


Figure 2. Modeling technology route
图 2. 建模技术路线图

3.4. MIKE 21 模型建立

3.4.1. 计算范围

二维模型计算范围应包括光谷中心城所在的东湖高新区的中部，考虑到降雨汇流面积以及排洪入湖的需要，本次计算范围较光谷中心城区域扩大，计算范围北起黄家村附近，南至豹澥湖，西起光谷一路，东至郑家附近。

3.4.2. 网格剖分

对光谷中心城区进行网格剖分。研究区域的建筑和道路比较规则且考虑到模型运行的时间和效率等因素，网格剖分采用规则 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的结构化矩形网格。

3.5. MIKE FLOOD 模型建立

光谷中心城区由于水系被道路分割为不同片区，仅分布有零星水塘和沟渠，需要采用地面二维、地下管网耦合的模型进行降雨内涝的模拟。

在 MIKE FLOOD 环境下通过地下管网模型中的检查井与相应的二维模型中的计算网络连接使得 MIKE 21 和 MIKE URBAN 实现耦合计算。

3.6. 参数设置

3.6.1. 降雨设置

采用武汉市短历时暴雨的暴强公式，暴雨重现期为 50 年一遇：

$$q = \frac{557(1 + 0.96 \lg \lg P)}{(t + 2.26)^{0.432}} \quad (6)$$

式中： q ——设计暴雨强度 $[\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)]$ ； P ——重现期(a)； t ——降雨历时(min)；

3.6.2. 地面糙率

依据土地下垫面的不同而赋予不同的地面糙率，在模型中糙率以曼宁值体现，在分析光谷中心城具体情况下，同时也参考了其他城市模型模拟的设置，具体见图 3。

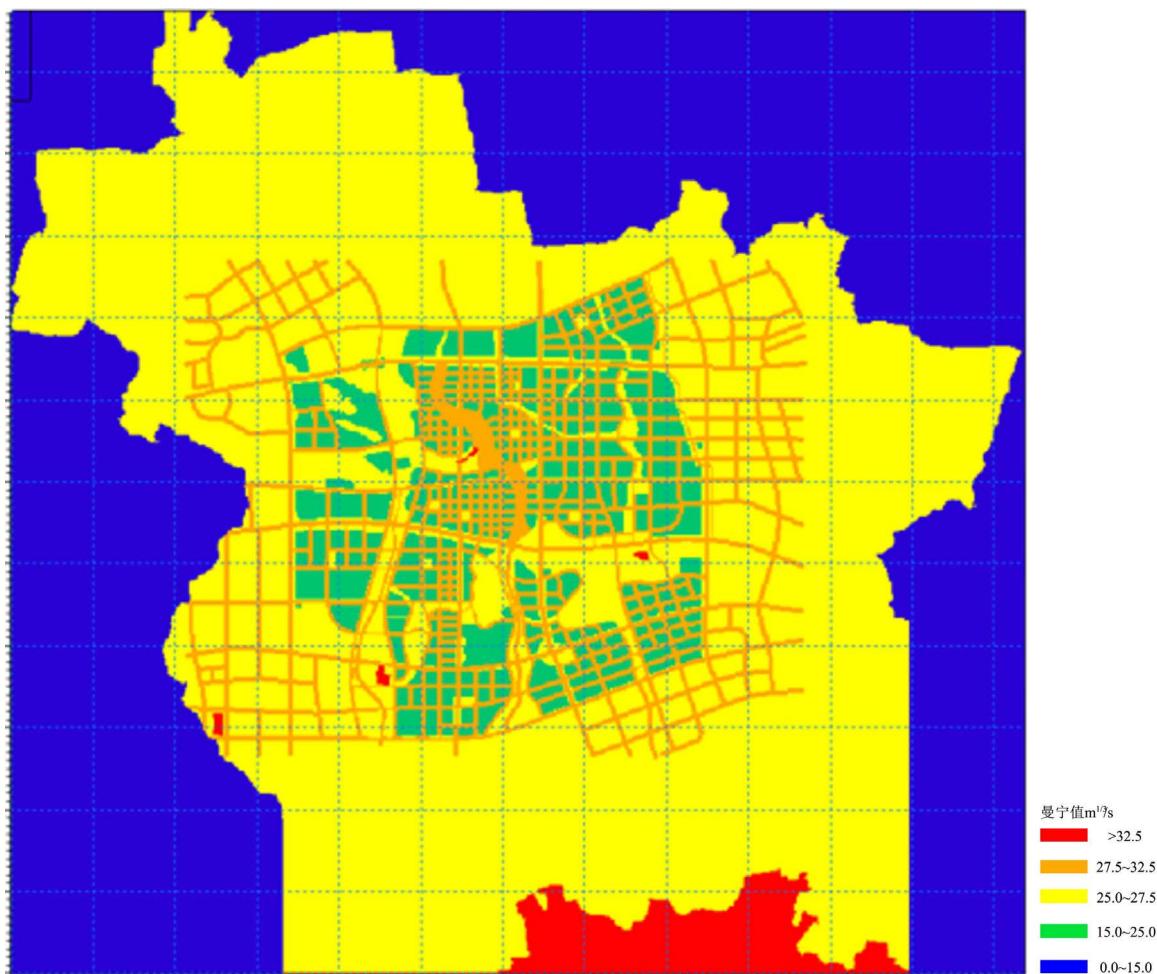


Figure 3. The roughness of Guanggu central city
图 3. 光谷中心城区糙率图

3.7. 模型验证

由于水文资料有限,目前关于光谷中心城的内涝资料为2016年6月底发生的特大暴雨灾情记录,可对模型的准确性进行分析。由灾情资料显示在一周的暴雨期间,城区光谷六路在高新二路到高新三路的路段附近以及高新三、四路与光谷三、四路合围区域内涝比较严重。对比模型计算的最终结果,可以看出模型计算结果中的受灾区域与灾情状况基本吻合。在模型的计算结果中,有部分区域也面临一定的积水风险,而灾情资料中没有,主要是因为灾情资料调查的范围有限,信息来源不足。总体来说,模型计算的具有防涝风险的区域与实际情况基本吻合,模型可用于光谷中心城地区的防涝风险研究。

4. 模拟结果分析

4.1. 城市洪水演进过程分析

根据《武汉市中心城区排水防涝规划》,武汉市的防涝目标为有效应对50年一遇暴雨,所以对光谷中心城区在50年一遇降雨条件下的洪水演进情况进行模拟,在不同时刻城区淹没情况如图4所示。

降雨6小时,在武钢公司附近区域,中心城东北部中国医药集团附近的低洼区域积水水深大于0.4 m,局部水深超过0.8 m,市区其他大部分区域淹没水深均小于0.01 m。降雨12小时,随着降雨强度增大,

地面径流也进一步增加，各水系的积水范围扩大、水深加大，分别逐步汇入东湖和豹澥湖。市区低洼处等局部区域水深超过 0.4 m，中心城其他区域地面积水超过 0.15 m 的范围不断扩大。降雨 16 小时，此时降雨强度达到最大值，地面积水尤为明显。市区地面大部分区域有积水现象，尤其在武钢公司附近，梅家村东侧附近积水明显，水深超过 0.8 m，局部超过 1.0 m，淹没范围也达到最大。其它各路段附近淹积水深超过 0.3 m 的面积增加。降雨 24 小时，随着降雨强度减小，排水系统的持续作用，市区大部分地面积水小于 0.15 m，局部低洼区域如光谷十七小学南侧区域积水明显，超过 0.8 m。局部地面低洼处积水仍有 0.8 m 以上的水深。豹子溪、新月溪、九峰溪水系及其附近水深超过 0.8 m，局部超过 1.0 m。

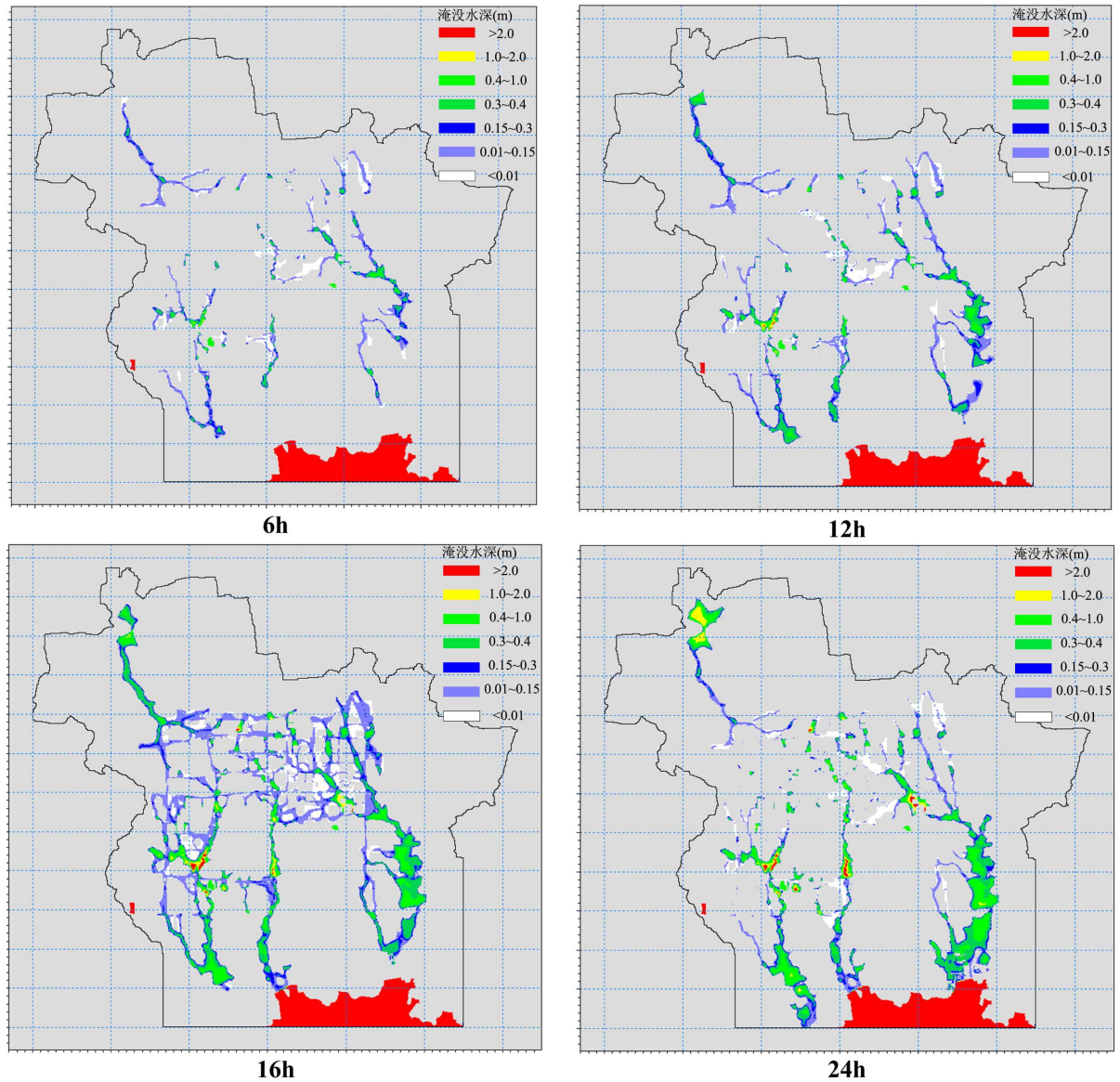


Figure 4. Depth of water accumulation in different time

图 4. 不同时刻积水深度图

4.2. 洪涝风险图绘制

根据武汉市对城市内涝风险等级划分，市区地面积水小于 0.15 m 为一般积水，风险等级蓝 IV；积水

深度大于 0.15 m 小于 0.3 m 且积水时间大于 30 分钟，对城市正常交通造成影响，风险等级黄 III；积水深度大于 0.3 m 小于 0.4 m，积水时间大于 15 分钟，致使城市交通受到严重影响，风险等级橙 II；积水深度大于 0.4 m，致使城市交通、基础设施和各类建筑物受到威胁，风险等级红 I。城市内涝风险等级划分详情见表 1。

Table 1. Wuhan waterlogging risk grade division
表 1. 武汉市内涝风险等级划分

风险等级	划分依据		
	积水深度	积水时间	危险程度
红 I	>0.4 m	-	城市交通、基础设施和各类建筑物受到威胁
橙 II	0.3 m~0.4 m	大于 15 min	城市交通受到严重影响
黄 III	0.15 m~0.3 m	大于 30 min	城市交通不便
蓝 IV	<0.15 m	-	一般积水

根据等级划分规则，绘制光谷中心城在 50 年一遇降雨条件下对应的区域洪涝风险图，并根据光谷中心城的内涝资料对洪水风险图的准确性进行评估。根据 2016 年 6 月底发生的特大暴雨灾情记录中记载的易涝点位置和相应的受灾程度与洪水风险图中的受灾区域与风险等级基本吻合，洪水风险图可用于防涝分析研究。风险图如图 5 所示。

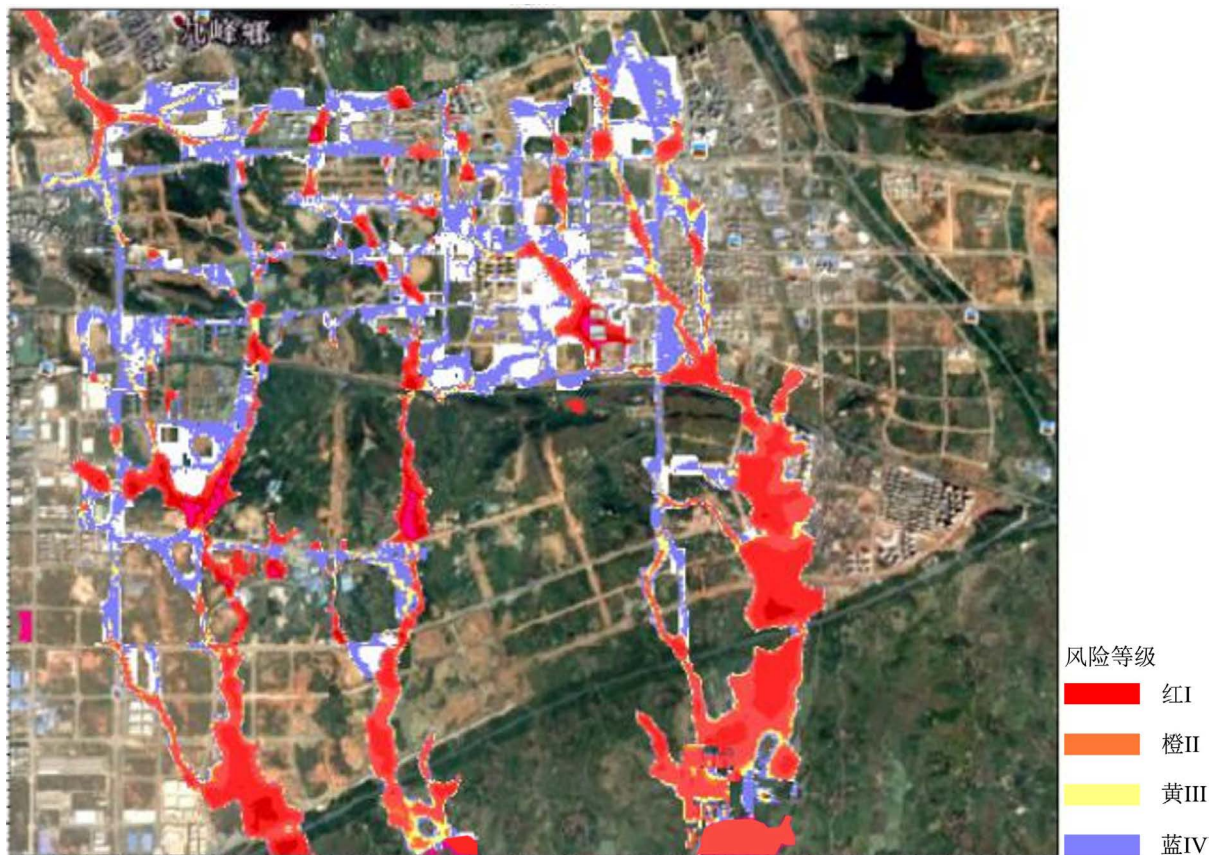


Figure 5. Flood map for 50 a return period
图 5. 50 年一遇洪水风险图

通过对 50 年一遇洪水风险图分析可知：大部分区域积水深度小于 0.15 m，多数路段洪水风险等级为蓝 IV。局部路段积水深度在 0.15 m 至 0.3 m 之间，以国药控股湖北有限公司西北侧、泰然生物谷西北侧、中建科技产业园南侧为主，风险等级为黄 III。明志医学检验实验室西北侧、三里村东南侧等区域积水深度大于 0.3 m 小于 0.4 m，风险等级橙 II。都市环保武汉水务有限公司西北侧、朗诗地产东南侧、绿地国际理想城南侧等局部区域积水深度大于 0.4 m，风险等级为红 I。

4.3. 内涝原因分析

利用 MIKE 模型计算了 50 年一遇降雨条件下光谷中心城的洪涝情况并绘制出洪水风险图，明确了面临较大防涝风险的区域，对易涝点原因进行分析如下：

1) 光谷中心城从南向北地势逐渐降低，从模拟结果来看，地势较低的地方容易发生内涝且比较集中。雨水汇水在地势较低处容易聚集，无法顺畅排出，存在积涝风险。

2) 城区目前正在开发建设阶段，城市化的进程南北差异明显，城区南部开发程度较大，北部以自然地貌为主。通过洪水风险图可以看出城区南部易涝点较多且较为分散。一方面是因为在城市建设过程中改变了下垫面，不仅使雨水无法渗入土地而且加快了雨水聚集的过程；另一方面城市在建设时期，相关的雨水排水措施不完善，没有足够的排水能力，导致局部地区面临着内涝的风险。

3) 目前光谷中心城有许多天然的小池塘，尤其在九峰溪和新月溪水系附近的区域，在降雨初期起到了储水的作用，但当降雨量变大，超过了池塘的储水能力，就会对周边区域产生淹水风险。

4) 管网建设问题。

管网计算结果如图 6~7 所示，分别为管道充满度和检查井溢流状况分布图。从图中可看出，管道充满度基本小于 0.1，局部在 0.1 与 0.2 之间。降雨 16 小时情况下大部分检查井未出现溢流，局部溢流在 1.0 m 以内，大致分布在碧桂园云玺附近的检查井，另外有极少数检查井溢流超过 1.0 m，主要集中在朗诗地产东南侧和保利国际理想城南侧附近。

分析可知部分检查井溢流是因为管道管径较小，前期在设计雨水排水管道时低估了部分地区的排水量，管径较小使得过流能力不足，在发生暴雨时容易产生积水。

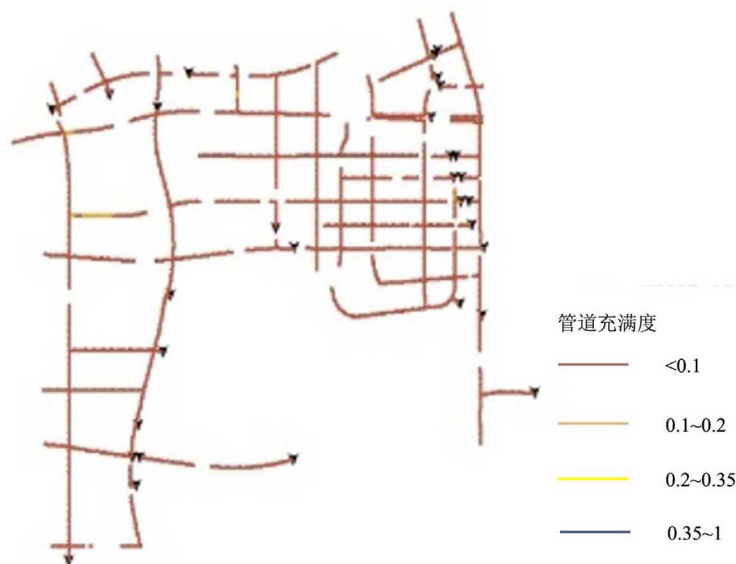


Figure 6. Pipeline network filling distribution map
图 6. 管网充满度分布图



Figure 7. Overflow distribution map of inspection well
图 7. 检查井溢流分布图

5. 结论

本文利用 MIKE FLOOD 平台对在开发建设过程中的光谷中心城在 50 年一遇降雨重现期下的内涝情况进行了模拟计算并分析积涝原因, 得出结论和建议如下:

1) 基于 MIKE FLOOD 平台构建的模型能够很好的模拟城市内涝洪水过程。在城市规划前期, 借助模型能够直观的评估城市面临的洪涝灾害风险, 有针对性的指导管网设计、水系规划、城市建设规划和制定相应的防洪策略, 有效减少城市运行和发展过程中由于水灾害造成的经济损失。

2) 通过分析可知处在开发建设中的城区部分区域面临着洪涝风险的威胁, 主要原因是地势较低、配套排水工程不完善、行洪廊道不畅通和管网建设问题。

3) 应加强居民的防洪意识, 在民众中推广普及洪水风险图的应用, 使其对生活区域的洪涝风险有所了解, 在城市遭遇暴雨时能够及时开展自救。

参考文献

- [1] 刘敏, 权瑞松, 许世远. 城市暴雨内涝灾害风险评估: 理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 11-13.
- [2] 张杰. 基于 GIS 和 SWMM 的郑州市暴雨内涝研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [3] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于 MIKE11 和 MIKE21 的城市暴雨洪涝灾分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 446-451.
- [4] 赵燕霞. 基于水力学模型的城市除涝方案分析研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] Danish Hydraulic Institute (2012) MIKE11 User Manual. DHI, Copenhagen.
- [6] 冯艳杰, 肖建华. SWMM 模型在城市排水系统中的应用[J]. 地理空间信息, 2011, 9(5): 125-129.
- [7] 谭琼. 排水系统模型在城市雨水水量管理中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [8] 陈虹, 雷少青, 王胜安. 福州市大学新区暴雨洪水积涝数学模型研究与应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 137-142.
- [9] Wang, Y.H., Wang, H., Lei, X.H., Jiang, Y.Z. and Song, X.S. (2011) Flood Simulation Using Parallel Genetic Algorithm Integrated Wavelet Neural Networks. *Neurocomputing*, 74, 2734-2744.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.03.018>
- [10] 韩素芹. 天津市城区暴雨沥涝动态仿真模拟系统[J]. 灾害学, 2001, 16(1): 14-19.

-
- [11] 张成才, 常静, 孙喜梅, 叶伟. 基于 GIS 的洪水淹没场景三维可视化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 22-28.
- [12] 梁彬锐. MIKE11 模型在沙井河片区防洪排涝工程中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2008(7): 81-83.
- [13] 姬战生, 张飞珍, 孙映宏. 杭州市上塘河流域防洪能力分析[J]. 浙江水利科技, 2012(184): 46.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org